



Evaluation of Alternative Fuels to Motor Gasoline in Iran: A Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Analysis

Masoud Hami Nowestali

Ph.D. in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran (Corresponding Author).

Email: Masoud.Hami92@gmail.com

Alireza Arab

Assistant Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Email: alireza.arab@umz.ac.ir

Mohammad Ali Sheikholeslam

Ph.D. Candidate in Science and Technology Policy, Faculty of Science and Technology, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Email: m_sheikholeslam@pgre.iust.ac.ir

Saeid Abdollahi Lashaki

Ph.D. Candidate in Transportation Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Email: Saeidlashaki@gmail.com

Abstract

Today, alternative fuels have attracted attention as a necessary solution because of their effective role in reducing dependence on gasoline and addressing its environmental and economic consequences. This study employs fuzzy multi-criteria decision-making methods to evaluate alternatives to gasoline and select the most suitable option for Iran. For this purpose, eleven fuels—gasoline and ten alternative fuels—were evaluated based on economic, technical-technological, environmental, and policymaking criteria. The fuzzy best-worst method (BWM) and fuzzy VIKOR method were used to determine the criteria weights and rank the fuels, respectively. The results showed that the economic criterion had the highest weight (0.354), followed by the technical-technological criterion (0.275), the environmental criterion (0.244), and the policymaking criterion (0.127). Based on the fuzzy VIKOR method, electric fuel ranked first and was selected as the best option for Iran's transportation sector. Following electric fuel, compressed natural gas (CNG), liquefied natural gas (LNG), liquefied petroleum gas (LPG), ethanol, methanol, gasoline, petroleum diesel, biogas, biodiesel, and hydrogen ranked second through eleventh, respectively. These findings indicate the high potential of electric vehicles for replacing gasoline engines and their key role in the future of the country's transportation industry.

Keywords: Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making, Gasoline Alternative, Sustainable Transportation, Electric Fuel, Alternative Fuel





سال نهم، شماره دوم (پیاپی ۳۰)، تابستان ۱۴۰۵، صص. ۲۶۵-۳۰۴
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

مقاله پژوهشی

ارزیابی سوخت‌های جایگزین برای بنزین موتور در ایران: یک تحلیل تصمیم‌گیری چندشاخصه ترکیبی فازی

مسعود حامی نواسطلی

دانش‌آموخته دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران (نویسنده مسئول)
Email: Masoud.Hami92@gmail.com

علیرضا عرب

استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اقتصادی و اداری دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران
Email: alireza.arab@umz.ac.ir

محمدعلی شیخ‌الاسلام

دانشجوی دکتری سیاست‌گذاری علم و فناوری، دانشکده مهندسی پیشرفت، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
Email: m_sheikholislam@pgre.iust.ac.ir

سعید عبدالهی لاشکی

دانشجوی دکتری مهندسی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
Email: Saeidlashaki@gmail.com

چکیده

امروزه سوخت‌های جایگزین، به دلیل نقش مؤثر خود در کاهش وابستگی به بنزین و پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی آن، به عنوان یک راهکار ضروری مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پژوهش با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی، به ارزیابی سوخت‌های جایگزین بنزین و انتخاب مناسب‌ترین گزینه برای ایران می‌پردازد. به این منظور، یازده سوخت (بنزین به همراه ده سوخت جایگزین) از منظر شاخص‌های اقتصادی، فنی-فناوری، زیست‌محیطی و سیاست‌گذاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، از روش‌های بهترین-بدترین فازی و ویکور فازی به ترتیب جهت وزن‌دهی به شاخص‌ها و رتبه‌بندی سوخت‌ها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در میان شاخص‌های اصلی، شاخص اقتصادی با وزن ۰/۳۵۴ بیشترین اهمیت را دارد و پس از آن، شاخص فنی-فناوری (۰/۲۷۵)، شاخص زیست‌محیطی (۰/۲۴۴) و شاخص سیاست‌گذاری (۰/۱۲۷) قرار می‌گیرند. براساس روش ویکور فازی، سوخت الکتریکی رتبه نخست را کسب کرده و به عنوان بهترین گزینه برای بخش حمل‌ونقل ایران انتخاب شده است. پس از آن، به ترتیب سوخت‌های گاز طبیعی فشرده (CNG)، گاز طبیعی مایع (LNG)، گاز نفتی مایع (LPG)، اتانول، متانول، بنزین، دیزل نفتی، بیوگاز، بیودیزل و هیدروژن در رتبه‌های دوم تا یازدهم قرار گرفته‌اند. این نتایج نشان‌دهنده ظرفیت بالای خودروهای الکتریکی برای جایگزینی موتورهای بنزینی و نقش کلیدی آن‌ها در آینده صنعت حمل‌ونقل کشور است.

کلیدواژه‌ها: تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی، جایگزین بنزین، حمل‌ونقل پایدار، سوخت الکتریکی، سوخت جایگزین

دانشگاه عالی دفاع ملی ♦ پژوهشکده آماد، فناوری دفاعی و عرصه‌های نوپدید / فصلنامه آماد و فناوری دفاعی



20.1001.1.28212606.1405.9.2.9.3

<https://amfad.sndu.ac.ir/> E-ISSN: 2980-8073



صحت مطالب بر عهده نویسنده مقاله است و بیانگر دیدگاه دانشگاه عالی دفاع ملی نیست.



مقدمه

استفاده از سوخت‌های جایگزین در بخش حمل‌ونقل، به دلیل نقش راهبردی آن در تقویت توان دفاعی، توسعه اقتصادی و کاهش آلاینده‌گی، به یک ضرورت انکارناپذیر تبدیل شده است. در شرایطی که سوخت‌های فسیلی به عنوان منابعی محدود و ناپایدار شناخته می‌شوند، افزایش تقاضا برای گزینه‌های پایدارتر و سازگار با محیط‌زیست بیش از هر زمان دیگری احساس می‌شود (خان و همکاران^۱، ۲۰۲۳؛ ۱۱۳۴۸۳). به همین دلیل، بسیاری از کشورها با ایجاد مشوق‌های اقتصادی، اصلاح سیاست‌های انرژی و توسعه زیرساخت‌های سوخت پاک، مسیر گذار از سوخت بنزین به سوخت‌های جایگزین را تسریع کرده‌اند (اوکوه و اونوها^۲، ۲۰۲۴؛ ۱۰۲۷۸۹؛ حسن و همکاران^۳، ۲۰۲۴؛ ۳۱۰-۳۳۳).

با وجود این تحولات جهانی، بخش حمل‌ونقل سبک ایران همچنان به بنزین وابسته است. در حال حاضر، حدود ۸۵ درصد از سبد سوختی بخش حمل‌ونقل سبک کشور را بنزین تشکیل می‌دهد که این امر مشکلات متعددی را به همراه داشته است (تسنیم، ۱۴۰۳). در سال‌های اخیر، مصرف بنزین در کشور از میزان تولید داخلی آن فراتر رفته و این مسئله واردات بنزین را اجتناب‌ناپذیر کرده است (عرب و همکاران، ۱۴۰۳؛ ۲۶۷-۲۹۴). در چنین شرایطی، هرگونه اختلال در زنجیره تأمین بنزین، کشور را با چالش‌های اقتصادی و اجتماعی جدی مواجه می‌کند (خلیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ ۲۷-۷۹). افزون بر این وابستگی شدید به بنزین، هوای شهرها را آلوده‌تر کرده، سلامت انسان‌ها را به خطر انداخته و کیفیت زندگی را کاهش داده است. این شرایط نه تنها باعث افزایش بیماری‌ها می‌شود، بلکه با افزایش غیبت‌های کاری و تحصیلی، اقتصاد کشور را تحت فشار قرار داده و بار سنگینی بر دوش نظام سلامت گذاشته است (صحت‌پور و کاظمی، ۲۰۱۸؛ ۳۰۴-۳۱۹؛ بیات و همکاران، ۲۰۱۹؛ ۱۰۸۵۴۷). از منظر امنیت ملی نیز، تمرکز بیش از حد بر یک سوخت، تاب‌آوری کشور را در

1. Khan et al.
2. Okoh and Onuoha
3. Hassan et al.



برابر تحریم‌ها و بحران‌های انرژی کاهش داده و ساختار تأمین سوخت را آسیب‌پذیر کرده است (گائو و همکاران^۱، ۲۰۱۸: ۱۸۱-۱۷۱).

در این راستا، کشور ایران نیاز دارد تا سوختی را به‌عنوان جایگزین بنزین در نظر بگیرد. توجه و استفاده از سوخت‌های جایگزین بنزین برای کشور از جنبه‌های مختلف دارای اهمیت است. با توجه به نوسانات قیمت جهانی بنزین و محدودیت‌های بین‌المللی، استفاده از سوخت‌های جایگزین می‌تواند نیاز به واردات بنزین را کاهش دهد و هزینه‌های مرتبط با آن را کم کند. در ضمن، با کاهش مصرف داخلی بنزین، امکان افزایش صادرات نفت خام فراهم می‌شود که این موضوع سبب افزایش درآمدهای ارزی کشور می‌شود.

یکی دیگر از مزایای استفاده از سوخت‌های جایگزین، کاهش وابستگی کشور به یک منبع سوختی خاص است. تنوع در منابع انرژی، تاب‌آوری کشور را در برابر بحران‌های انرژی افزایش داده و اثر تحریم‌های بین‌المللی بر اقتصاد را کم‌تر می‌کند. همچنین، بهره‌برداری از منابع مختلف انرژی، زیرساخت‌های کشور را در برابر حملات نظامی یا خرابکاری‌های تروریستی مقاوم‌تر می‌سازد. در چنین شرایطی، اگر بخشی از زیرساخت‌های انرژی آسیب ببیند، استفاده از منابع جایگزین می‌تواند تداوم تأمین انرژی را تضمین کند.

علاوه بر این، توسعه فناوری‌های مرتبط با سوخت‌های جایگزین، زمینه‌ساز ایجاد شرکت‌های جدید و فرصت‌های شغلی خواهد شد که در نهایت به افزایش رفاه و رضایتمندی اجتماعی کمک می‌کند. در کنار این موارد، حرکت به سمت استفاده از سوخت‌های پاک، انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده و نقش مهمی در کاهش گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. با توجه به توضیحات ارائه شده، اهمیت انجام تحقیق حاضر شامل موارد زیر است:

- ♦ ایجاد توازن بین عرضه و تقاضای بنزین؛
- ♦ تقویت توان دفاعی کشور، افزایش امنیت ملی و حفظ استقلال سیاسی؛
- ♦ افزایش رضایتمندی اجتماعی و ایجاد شغل‌های مرتبط با صنعت سوخت‌های جایگزین؛

❖ کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و کمک به بهبود کیفیت زندگی شهری.

این پژوهش با هدف شناسایی سوخت‌های جایگزین بنزین موتور در ایران و سایر کشورهای جهان و در نهایت انتخاب مناسب‌ترین گزینه متناسب با شرایط ایران انجام می‌شود. در این راستا، محقق با بررسی مزایا و معایب انواع سوخت‌های جایگزین و تحلیل شاخص‌های کلیدی ارزیابی آن‌ها، تلاش دارد تا با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی ترکیبی، بهترین گزینه را برای جایگزینی بنزین موتور در کشور تعیین کند.

۱. مبانی نظری پژوهش

سوخت‌های مختلفی به‌عنوان جایگزین بنزین در ایران و در سطح بین‌الملل مطرح شده‌اند که هرکدام دارای مزایا و معایبی هستند و نیاز به بررسی دقیق دارند (رمداس^۱، ۲۰۱۱). در پژوهش حاضر، یازده سوخت (بنزین به‌همراه ۱۰ سوخت جایگزین) ارزیابی می‌شوند. در جدول (۱)، خلاصه‌ای از ویژگی‌های هر سوخت و مراجع بررسی‌کننده سوخت مورد نظر ارائه شده است.

جدول ۱: شرح مختصری از سوخت‌های جایگزین و معرفی مراجع بررسی‌کننده سوخت مورد نظر

نوع سوخت	تشریح	مراجع
بنزین	بنزین به‌عنوان سوخت اصلی در موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود.	(محمدآبادی و همکاران، ۲۰۰۹؛ ابوشقره و همکاران ^۲ ، ۲۰۲۲).
دیزل نفتی	سوخت دیزل که به‌نام گازوئیل نیز شناخته می‌شود، یک نوع سوخت مایع است که عمدتاً از تقطیر نفت خام به دست می‌آید.	(محمدآبادی و همکاران، ۲۰۰۹؛ صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷).
«گاز طبیعی فشرده» ^۳ (CNG)	گاز طبیعی فشرده (CNG) یک نوع سوخت جایگزین است که عمدتاً از متان (CH ₄) تشکیل شده است.	(محمدآبادی و همکاران، ۲۰۰۹؛ اوزتایسی و همکاران ^۴ ، ۲۰۱۷).

1. Ramadhas

2. Aboushaqrah et al.

3. Compressed natural gas (CNG)

4. Oztaysi et al.



نوع سوخت	تشریح	مراجع
«گاز طبیعی مایع» ^۱ (LNG)	گاز طبیعی مایع (LNG) شکلی از گاز طبیعی است که برای حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی آسان‌تر به مایع تبدیل شده است.	(میمون ^۲ و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۴۹-۳۶۱).
«گاز نفتی مایع» ^۳ (LPG)	گاز نفتی مایع (LPG) یک سوخت جایگزین پرکاربرد است که از هیدروکربن‌های سبک مانند پروپان (C3H8) و بوتان (C4H10) تشکیل شده است.	(محمدآبادی و همکاران، ۲۰۰۹: اوزتایسی و همکاران، ۲۰۱۷).
هیدروژن	هیدروژن به‌عنوان سوخت آینده شناخته می‌شود و با داشتن ویژگی‌های جذاب، گزینه‌ای مناسب برای استفاده در وسایل نقلیه جاده‌ای محسوب می‌شود.	(اوغورلو و اوزتونا ^۴ ، ۲۰۱۵: ۱۱۱۷۷-۱۱۱۸۸؛ صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰).
اتانول	اتانول یک نوع الکل ساده است که به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان سوخت، حلال و ماده اولیه در تولید بسیاری از مواد شیمیایی و دارویی استفاده می‌شود.	(لی و همکاران ^۵ ، ۲۰۱۹: ۸۲۶-۸۴۰؛ اوزتایسی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۲۸-۱۴۸).
متانول	متانول یک مایع سمی، بی‌رنگ، بی‌مزه و با بوی بسیار ضعیف است. از آنجایی که متانول به‌صورت مایع تولید می‌شود، مانند بنزین ذخیره و نگهداری می‌شود.	(اوغورلو و اوزتونا ^۴ ، ۲۰۱۵: ۱۱۱۷۷-۱۱۱۸۸؛ صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰).
بیودیزل	بیودیزل یک سوخت تجدیدپذیر و زیستی است که از منابع طبیعی مانند روغن‌های گیاهی (مانند روغن سویا و روغن پالم) و چربی‌های حیوانی تولید می‌شود.	(تسیتا و پیلواچی ^۶ ، ۲۰۱۲: ۶۷۷-۶۸۶؛ اوزتایسی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۲۸-۱۴۸).
بیوگاز	بیوگاز از فرایند هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی مرطوب تولید می‌شود. بیوگاز تولید شده در این فرایند می‌تواند برای تأمین گرما و یا الکتریسیته سوزانده شود.	(صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰).
سوخت الکتریکی	سوخت الکتریکی به معنای انرژی الکتریکی است که برای تأمین نیروی وسایل نقلیه الکتریکی و هیبریدی به کار می‌رود.	(لی و همکاران، ۲۰۱۹: ۸۲۶-۸۴۰؛ الحفداوی و همکاران ^۷ ، ۲۰۲۴: ۱۰۰۹۲-۱۰۰۹۳).

1. Liquid natural gas (LNG)
2. Maimoun et al.
3. Liquefied petroleum gas (LPG)
4. Ugurlu & Oztuna
5. Li et al.
6. Tsita & Pilavachi
7. El Hafdaoui et al.

انتخاب سوخت جایگزین برای بنزین در کشور ایران یک فرایند پیچیده است. برای مدیریت این پیچیدگی، می‌توان هر نگرانی مرتبط را به شکل یک شاخص ارزیابی تعریف کرد. شاخص‌های ارزیابی، چهارچوبی برای مقایسه جایگزین‌ها از دیدگاه‌های مختلف ارائه می‌دهند. انتخاب این شاخص‌ها، به‌عنوان یک گام اساسی در ایجاد مدل تصمیم‌گیری، نقشی کلیدی در حل مسائل پیچیده دارد (بارت^۱، ۲۰۱۱). جدول (۲) شرح مختصری از شاخص‌های ارزیابی استخراج‌شده از پیشینه تحقیقات را ارائه می‌دهد.

جدول ۲: شرح مختصری از شاخص‌های ارزیابی مستخرج از پیشینه تحقیقات.

شاخص اصلی	زیرشاخص	تشریح	مراجع
اقتصادی	هزینه تأمین و توزیع سوخت	شامل کلیه هزینه‌هایی است که صرف تأمین و انتقال سوخت به جایگاه سوخت می‌شود.	(صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰).
	هزینه‌های پیاده‌سازی زیرساخت	هزینه‌های پیاده‌سازی زیرساخت به سرمایه‌گذاری‌های اولیه و هزینه‌های ثابت مربوط به ایجاد امکانات جدید اشاره دارد.	(صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰).
	قیمت سوخت مصرفی	قیمت سوخت به‌عنوان هزینه سوخت به ازای هر کیلومتر مسافت طی شده (کیلومتر/دلار) محاسبه می‌شود.	(محمدآبادی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۱۲-۱۲۵).
فنی-فناوری	محتوای انرژی	این مقدار نشان می‌دهد که هر واحد از سوخت چقدر انرژی می‌تواند تولید کند.	(صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰).
	در دسترس بودن زیرساخت سوخت	برای اکثر سوخت‌های جدید در بخش حمل‌ونقل، زیرساخت‌های تأمین سوخت مناسب مورد نیاز خواهد بود.	(صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰).
	ایمنی سوخت	ایمنی سوخت شامل مواردی مانند خطر انفجار، خطر آتش‌سوزی، سمیت برای انسان و سمیت زیست‌محیطی می‌شود.	(صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰؛ اوزتایسی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۲۸-۱۴۸).



شاخص اصلی	زیرشاخص	تشریح	مراجع
	بلوغ فناوری سوخت	بلوغ فناوری سوخت نشان می‌دهد که یک فناوری چقدر آماده است تا به صورت گسترده و تجاری مورد استفاده قرار گیرد.	(لی و همکاران، ۲۰۱۹: ۸۲۶-۸۴۰).
زیست‌محیطی	انتشار گازهای گلخانه‌ای	تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌تواند منجر به بروز پدیده‌های جوی شدید مانند امواج گرما، طوفان‌ها، سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها شود.	(محمدآبادی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۱۲-۱۲۵؛ اوزتایسی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۲۸-۱۴۸).
	انتشار گازهای آلاینده	آلاینده‌های محیط‌زیست معمولاً به موادی اطلاق می‌شود که می‌توانند به طور مستقیم باعث مشکلات سلامتی مانند مشکلات تنفسی، آلرژی‌ها و بیماری‌های قلبی شوند.	(میمون و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۴۹-۳۶۱).
	انتشار ذرات معلق جامد	ذرات معلق جامد ناشی از احتراق سوخت در موتور خودرو به دستگاه تنفسی تحتانی و حتی به جریان خون نفوذ می‌کنند.	(میمون و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۴۹-۳۶۱).
	آلودگی صوتی	سروصدای بیش از حد می‌تواند باعث مشکلاتی مانند استرس، اختلالات خواب، کاهش تمرکز و حتی مشکلات شنوایی شود.	(حزام ۱ و همکاران، ۲۰۲۲: ۵۴۶۳).
اجتماعی	مقبولیت اجتماعی سوخت	مقبولیت اجتماعی به معنای پذیرش و استقبال عمومی از یک فناوری یا سوخت جدید است.	(صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰).
	تأثیر بر رفاه اجتماعی	رفاه اجتماعی به معنای بهبود کیفیت زندگی و شرایط اقتصادی و اجتماعی مردم است.	(صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰؛ تسیتا و پیلاواچی، ۲۰۱۲: ۶۷۷-۶۸۶).

شاخص اصلی	زیر شاخص	تشریح	مراجع
	نرخ اشتغال زایی	با افزایش توجه به سوخت‌های جایگزین، فرصت‌های جدیدی برای کارآفرینان ایجاد می‌شود.	(لی و همکاران، ۲۰۱۹: ۸۲۶-۸۴۰؛ تسیتا و پیلاواچی، ۲۰۱۲: ۶۷۷-۶۸۶).
سیاست‌گذاری	حمایت دولتی	دولت‌ها می‌توانند با ارائه یارانه‌ها و کمک‌های مالی برای خرید خودروهای با سوخت‌های جایگزین، به کاهش هزینه‌های اولیه برای مصرف‌کنندگان و کسب‌وکارها کمک کنند.	(حزام و همکاران، ۲۰۲۲: ۵۴۶۳).
	امنیت سوخت	امنیت سوخت به توانایی یک کشور یا منطقه در تأمین پایدار و مطمئن سوخت برای نیازهای خود اشاره دارد.	(صحت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹۵-۳۱۰؛ تسیتا و پیلاواچی، ۲۰۱۲: ۶۷۷-۶۸۶).

۲. پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی بر روی سوخت‌های جایگزین بنزین در کشور ایران و در سطح بین‌الملل انجام شده و این سوخت‌ها از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

«محمدآبادی و همکاران» (۲۰۰۹) یک «روش تصمیم‌گیری چندشاخصه»^۱ برای رتبه‌بندی خودروهای مختلف مبتنی بر سوخت‌های حمل‌ونقل جاده‌ای با استفاده از روش «پرامته»^۲ ارائه کردند. در این پژوهش، خودروهای بنزینی، هیبریدی (بنزینی-الکتریکی)، مخلوط اتانول و بنزین، دیزلی، بیودیزلی و گاز طبیعی فشرده به‌عنوان گزینه‌های جایگزین بررسی شدند. ارزیابی این گزینه‌ها براساس پنج شاخص اصلی انجام شد: هزینه خودرو، هزینه سوخت، فاصله میان ایستگاه‌های سوخت‌گیری، تعداد گزینه‌های موجود برای مصرف‌کنندگان و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای. نتایج نشان داد که در سناریوی پایه با تأکید بیشتر بر شاخص‌های

1. Multi-criteria decision-making method

2. Preference ranking organization method for enrichment evaluations (PROMETHEE)



اقتصادی، خودروهای بنزینی رتبه بالاتری داشتند. در مقابل، در سناریوی پایه با وزن‌دهی بیشتر به شاخص‌های زیست‌محیطی، خودروهای هیبریدی در رتبه اول و خودروهای بیودیزلی در رتبه دوم قرار گرفتند.

«تسیتا و پیلواچی» (۲۰۱۲) سوخت‌های جایگزین برای بخش حمل‌ونقل جاده‌ای کشور یونان را با استفاده از روش «تحلیل سلسله‌مراتبی»^۱ ارزیابی کردند. در این تحقیق، هفت سوخت جایگزین در نظر گرفته شده است: موتور احتراق داخلی و ترکیب آن با بنزین و بیودیزل نسل اول و دوم، «سلول سوختی»^۲، خودروهای هیبریدی، خودروهای هیبریدی قابل شارژ و خودروهای الکتریکی. ارزیابی سوخت جایگزین براساس دو شاخص هزینه و سیاست‌گذاری انجام گرفته است. نتایج نشان داد که موتور احتراق داخلی مخلوط با بیودیزل نسل اول و دوم مناسب‌ترین سوخت‌های جایگزین برای بخش حمل‌ونقل جاده‌ای کشور یونان است.

«اوغورلو و اوزتونا» (۲۰۱۵) سوخت‌های گاز نفتی مایع، گاز طبیعی فشرده، هیدروژن، بیودیزل، اتانول و متانول را همراه با فناوری‌های خودروهای الکتریکی، هیبریدی و سلول سوختی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که از دیدگاه اقتصادی، گاز نفتی مایع و گاز طبیعی فشرده به‌عنوان بهترین سوخت‌های جایگزین شناخته می‌شوند، درحالی‌که از منظر زیست‌محیطی، خودروهای الکتریکی و سلول سوختی به‌دلیل انتشار آلاینده‌گی کم، برتری دارند.

«صحت‌پور و همکاران» (۲۰۱۷) از طریق رویکرد چند شاخصه «پرامته»، سوخت‌های جایگزین مختلف برای خودروهای سبک در ایران را با در نظر گرفتن افق میان‌مدت ارزیابی کردند. بدین منظور، هشت سوخت جایگزین مختلف شامل گاز طبیعی فشرده، گاز مایع نفتی، دیزل نفتی، بیودیزل، بیوگاز، اتانول، متانول و هیدروژن مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این تحقیق، سوخت‌ها از جنبه‌های هزینه، فنی، اجتماعی و سیاست‌گذاری با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که گاز طبیعی فشرده و گاز نفتی مایع مناسب‌ترین سوخت‌های

1. Analytic hierarchy process (AHP)

2. Fuel cell

جایگزین برای خودروهای سبک در ایران هستند و بیوگاز در مقایسه با سایر سوخت‌های تجدیدپذیر جایگزین، اولویت بالاتری دارد.

«اوزتایسی و همکاران» (۲۰۱۷) به بررسی انتخاب فناوری سوخت جایگزین یک شرکت خدمات عمومی در ایالات متحده پرداختند. آن‌ها یک روش تصمیم‌گیری چند شاخصه مبتنی بر «مجموعه‌های فازی شهودی فاصله‌ای»^۱ با داده‌های زبانی را توسعه دادند. آن‌ها پنج شاخص اصلی شامل شاخص هزینه، ایمنی-عملکرد، سوخت‌رسانی آسان، زیست‌محیطی-اجتماعی و بلوغ بازار را در نظر گرفتند. در این مقاله، سوخت‌های گاز طبیعی فشرده، گاز نفتی مایع، اتانول، بیودیزل، الکتريسيته و هیدروژن مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بهترین تناسب برای شرکت خدمات عمومی، یک خودروی استفاده‌کننده از گاز طبیعی است.

«لی و همکاران» (۲۰۱۹) از تحلیل چند شاخصه برای اولویت‌بندی خودروهای انرژی پاک موجود و در حال عرضه در بازار چین استفاده کردند. در این پژوهش، از روش «تحلیل سلسله‌مراتبی» و «تکنیک ویکور»^۲ برای تصمیم‌گیری بهره گرفته شد. آن‌ها پنج شاخص اصلی شامل فناوری، اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و سیاست‌گذاری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که خودروهای الکتریکی بالاترین رتبه را به خود اختصاص داده‌اند و پس از آن خودروهای گازی، متانولی و اتانولی قرار دارند.

«امین‌طهماسبی و رضوی‌نسب» (۱۳۹۸) با استفاده از روش «تحلیل و توسعه گزینه‌های استراتژیک»^۳، راهکارهای جهت بهبود استفاده از سوخت گاز طبیعی فشرده در بخش حمل‌ونقل ایران باهدف کاهش هزینه‌های دولت، خودکفایی در تأمین بنزین و گازوئیل و افزایش رفاه اجتماعی ارائه کردند. براساس نتایج آن‌ها، تمایل به استفاده از گاز طبیعی فشرده به‌جای بنزین، توسعه پایدار گاز طبیعی فشرده و تدوین سند چشم‌انداز مناسب از موضوعات کلیدی در جهت بهبود استفاده از این سوخت در بخش حمل‌ونقل است.

1. Interval-valued intuitionistic fuzzy sets (IVIFS)

2. VIKOR method (Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje)

3. Strategic Options development and analysis (SODA)



«ابوشقره و همکاران» (۲۰۲۲) باهدف انتخاب تاکسی‌های پایدار با سوخت جایگزین، رویکردی ترکیبی شامل ارزیابی چرخه حیات هیبریدی و تصمیم‌گیری چندشاخصه ارائه کردند. آن‌ها ابتدا یک مدل چندمنطقه‌ای برای تحلیل اثرات پایداری خودروهای بنزینی، گاز طبیعی فشرده، هیبریدی و الکتریکی باتری‌دار توسعه دادند. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی مبتنی بر «مجموعه‌های نوتروسوفیک»^۱ وزن شاخص‌ها را محاسبه کرده و از روش «تاپسیس»^۲ برای رتبه‌بندی استفاده کردند. نتایج نشان داد که خودروهای الکتریکی باتری‌دار در جایگاه نخست قرار دارند و خودروهای گاز طبیعی فشرده در جایگاه دوم قرار گرفتند.

«الحفداوی و همکاران» (۲۰۲۴) باهدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش حمل‌ونقل، ارزیابی سوخت‌های جایگزین را در مغرب انجام دادند. این تحقیق به بررسی خودروهای دیزلی، هیبریدی الکتریکی، الکتریکی باتری‌دار و الکتریکی با سلول سوختی می‌پردازد و مزایای گذر به سمت خودروهای الکتریکی باتری‌دار و با سلول سوختی را برجسته می‌کند.

در جدول (۳) خلاصه‌ای از کارهای انجام شده در زمینه سوخت‌های جایگزین بنزین موتور در ایران و در سطح دنیا ارائه شده است. این مطالعات معمولاً سوخت‌ها و شاخص‌های ارزیابی محدودی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این در حالی است که انتخاب سوخت جایگزین مناسب برای کشور مستلزم در نظر گرفتن مجموعه‌ای جامع از سوخت‌ها و شاخص‌های ارزیابی در قالب یک مسئله تصمیم‌گیری چندشاخصه است که اثرات متعارض این عوامل نیز لحاظ گردد. برای پر کردن این خلأ پژوهشی، محقق قصد دارد از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی ترکیبی برای انتخاب سوخت جایگزین بنزین موتور در ایران استفاده نماید. دلیل استفاده از روش فازی این است که این روش‌ها به‌خوبی با پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های موجود در فرایند تصمیم‌گیری سازگار هستند. از آنجایی که انتخاب سوخت جایگزین بنزین اغلب با اطلاعات ناقص یا متناقض همراه است، روش‌های فازی

1. Neutrosophic sets

2. Technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

به‌خوبی قادرند این عدم قطعیت‌ها را مدیریت کنند. در این راستا، برای وزن‌دهی به شاخص‌های ارزیابی از «روش بهترین-بدترین»^۱ فازی استفاده شده و برای رتبه‌بندی سوخت‌ها از روش ویکور فازی استفاده می‌گردد.

جدول ۳: خلاصه‌ای از کارهای انجام شده در زمینه سوخت‌های جایگزین بنزین موتور

پژوهشگر	کشور مورد مطالعه	انواع سوخت‌های مورد بررسی	شاخص‌های ارزیابی	استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه	
				فازی	قطعی
محمدآبادی و همکاران (۲۰۰۹)	کانادا	بنزین، دیزل نفتی، گاز طبیعی فشرده، اتانول، بیودیزل و خودروی هیبریدی	اقتصادی و زیست‌محیطی	×	PROMETHEE
تسیتا و پیلاواچی (۲۰۱۲)	یونان	موتور احتراق داخلی و ترکیب آن با بنزین و بیودیزل نسل اول و دوم، سلول سوختی، خودروهای هیبریدی، خودروهای هیبریدی قابل شارژ و خودروهای الکتریکی	اقتصادی و سیاست‌گذاری	×	AHP
اوغورلو و اوزتونا (۲۰۱۵)	ترکیه	گاز نفتی مایع، گاز طبیعی فشرده، هیدروژن،	اقتصادی و زیست‌محیطی	×	×

1. Best-worst method (BWM)



پژوهشگر	کشور مورد مطالعه	انواع سوخت‌های مورد بررسی	شاخص‌های ارزیابی	استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه	
				قطعی	فازی
		بیودیزل، اتانول و متانول و همچنین فناوری‌های خودروهای الکتریکی، هیبریدی و سلول سوختی			
صحت‌پور و همکاران (۲۰۱۷)	ایران	گاز طبیعی فشرده، گاز مایع نفتی، دیزل نفتی، بیودیزل، بیوگاز، اتانول، متانول و هیدروژن	اقتصادی، فنی، اجتماعی و سیاست‌گذاری	PROMETHEE	×
اوزتایسی و همکاران (۲۰۱۷)	ایالات متحده	گاز طبیعی فشرده، گاز نفتی مایع، اتانول، بیودیزل، سوخت الکتریکی و هیدروژن	اقتصادی، ایمنی و عملکرد، سوخت‌رسانی آسان، زیست‌محیطی و اجتماعی و بلوغ بازار	×	Fuzzy IVIFS
لی و همکاران (۲۰۱۹)	استرالیا	گاز طبیعی فشرده، اتانول، متانول و سوخت الکتریکی	فناوری، اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و سیاست‌گذاری	AHP-VIKOR	×
امین‌طهماسبی و رضوی‌نسب (۲۰۱۹)	ایران	گاز طبیعی فشرده	اقتصادی و اجتماعی	SODA	×

پژوهشگر	کشور مورد مطالعه	انواع سوخت‌های مورد بررسی	شاخص‌های ارزیابی	استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه	
				قطعی	فازی
ابوشقره و همکاران (۲۰۲۲)	قطر	بنزین، گاز طبیعی فشرده و سوخت الکتریکی	اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی	x	Neutrosophic AHP-TOPSIS
الحفداوی و همکاران (۲۰۲۴)	مراکش	خودروهای دیزلی، هیبریدی، الکتریکی، الکتریکی باتری‌دار و الکتریکی با سلول سوختی	زیست‌محیطی	x	x
پژوهش حاضر (۲۰۲۵)	ایران	بنزین، دیزل، نفتی، گاز طبیعی فشرده، گاز طبیعی مایع، گاز نفتی مایع، هیدروژن، بیودیزل، بیوگاز، اتانول، متانول و سوخت الکتریکی	اقتصادی، فنی-فناوری، زیست‌محیطی و سیاست‌گذاری	x	Fuzzy BWM Fuzzy VIKOR

۳. روش‌شناسی پژوهش

قالب و چهارچوب پژوهش حاضر به شرح زیر است (ساندرز و همکاران^۱، ۲۰۰۹):

فلسفه تحقیق: فلسفه تحقیق حاضر از نوع عمل‌گرایی است. در این رویکرد فلسفی، از زبان و اندیشه به‌عنوان ابزاری برای حل مسئله و پیش‌بینی استفاده می‌شود. فلسفه عمل‌گرایی به

1. Saunders et al.



استفاده از روش‌های متنوع برای پاسخ‌گویی به سؤالات تحقیق توجه دارد و از ترکیب داده‌های کیفی و کمی برای یافتن بهترین راهکارها حمایت می‌کند.

رویکرد تحقیق: در این تحقیق از رویکرد استقرایی استفاده می‌شود. این نوع رویکرد با شناسایی روابط بین داده‌های جمع‌آوری شده، به تدوین مدل نهایی می‌انجامد.

راهبرد تحقیق: این لایه روش‌های مختلف تحقیق را شامل می‌شود. انواع روش‌های پژوهش علمی را معمولاً می‌توان با توجه به دو معیار هدف و روش گردآوری داده‌ها تقسیم‌بندی کرد. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی محسوب می‌شود. از آنجایی که تحقیق حاضر به شناسایی و مطالعه سوخت‌های جایگزین و شاخص‌های ارزیابی آن‌ها می‌پردازد، بنابراین براساس روش گردآوری داده‌ها، به صورت نظرسنجی (پیمایشی) است.

گزینه تحقیق: منظور از گزینه‌های تحقیق، نوع داده‌های پژوهشی است. طرح پژوهش حاضر به صورت کمی است. به عبارت دیگر، پژوهش حاضر به گردآوری داده‌های کمی می‌پردازد تا بتواند با وزن‌دهی به شاخص‌های ارزیابی و رتبه‌بندی سوخت‌های جایگزین، سوخت جایگزین برتر را برای کشور انتخاب نماید.

بازه زمانی: با توجه به اهداف این پژوهش، داده‌ها به صورت مقطعی گردآوری می‌شوند. روش‌ها و تکنیک‌ها: در کار حاضر به صورت هم‌زمان از مطالعات کتابخانه‌ای و مطالعات میدانی (مصاحبه و پرسش‌نامه) جهت گردآوری اطلاعات استفاده می‌شود. پرسش‌نامه‌ها برای نهایی‌سازی زیرشاخص‌ها وزن‌دهی به زیرشاخص‌ها و شاخص‌ها و امتیازدهی به سوخت‌ها بین خبرگان پژوهش حاضر توزیع می‌گردد.

۳-۱. مراحل اجرایی و گام‌های عملیاتی تحقیق

به صورت کلی، چهار مرحله برای انجام و تکمیل تحقیق حاضر پیش‌بینی شده که هر مرحله شامل چندین گام است. در شکل (۱) چهارچوب مراحل اجرایی و گام‌های عملیاتی انجام تحقیق حاضر نمایش داده شده است.

مرحله اول: مرور سیستماتیک پیشینه پژوهش، گردآوری سوخت‌های جایگزین و شاخص‌های ارزیابی آن‌ها؛ در این مرحله، ابتدا پژوهش‌های انجام‌شده درباره سوخت‌های جایگزین بنزین موتور در ایران و جهان به‌صورت سیستماتیک بررسی، تحلیل و مقایسه شدند. سپس، با توجه به پیشینه تحقیقات، انواع سوخت‌های جایگزین مورد استفاده در ایران و سایر کشورها شناسایی و گردآوری شدند. در گام بعدی، با تکیه بر پیشینه تحقیقات، شاخص‌ها و زیرشاخص‌های ارزیابی این سوخت‌ها شناسایی و دسته‌بندی گردیدند.

جهت گردآوری اطلاعات، علاوه بر منابع داخلی، از پایگاه‌های علمی معتبر مانند «گوگل اسکولار»^۱، «اسکوپوس»^۲ و «وب‌آوساینس»^۳ استفاده شده است. برای اطمینان از به‌روز بودن داده‌ها، جست‌وجوی منابع خارجی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ و منابع داخلی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۳ انجام شده است. پرتکرارترین کلیدواژه‌های جست‌وجو شامل «سوخت‌های جایگزین»، «سوخت‌های پاک»، «حمل‌ونقل پایدار»، «تصمیم‌گیری چندشاخصه» و «روش‌های وزن‌دهی و رتبه‌بندی فازی» بوده است. در نهایت، از میان حدود ۴۰ منبع فارسی، تعداد ۱۵ منبع و از میان حدود ۱۰۰ منبع خارجی، تعداد ۵۰ منبع که بیشترین ارتباط را با موضوع تحقیق داشتند، انتخاب شده و منابعی که ارتباط ضعیف‌تری با موضوع پژوهش داشتند، کنار گذاشته شدند. همچنین، برای تجزیه‌وتحلیل ارتباطات بین متون و داده‌ها، ارائه آمار توصیفی و تدوین شبکه‌های علمی، از نرم‌افزارهای تحلیل سیستماتیک مانند VOS viewer استفاده شد تا تصویری شفاف، ساختاریافته و بصری از موضوع پژوهش ترسیم شود، به‌گونه‌ای که روندهای علمی، همبستگی‌های پژوهشی و شکاف‌های تحقیقاتی در این حوزه به‌خوبی نمایان گردد.

مرحله دوم: بومی‌سازی (نهایی‌سازی) زیرشاخص‌ها؛ در گام اول از مرحله دوم، خبرگان متخصص و باتجربه انتخاب شده و پنل خبرگان آماده می‌گردد. در گام بعد، پرسش‌نامه روش «دلفی فازی»^۴ برای زیرشاخص‌های استخراج‌شده از پیشینه پژوهش‌ها در اختیار خبرگان قرار

1. Google Scholar
2. Scopus
3. Web of Science
4. Fuzzy Delphi



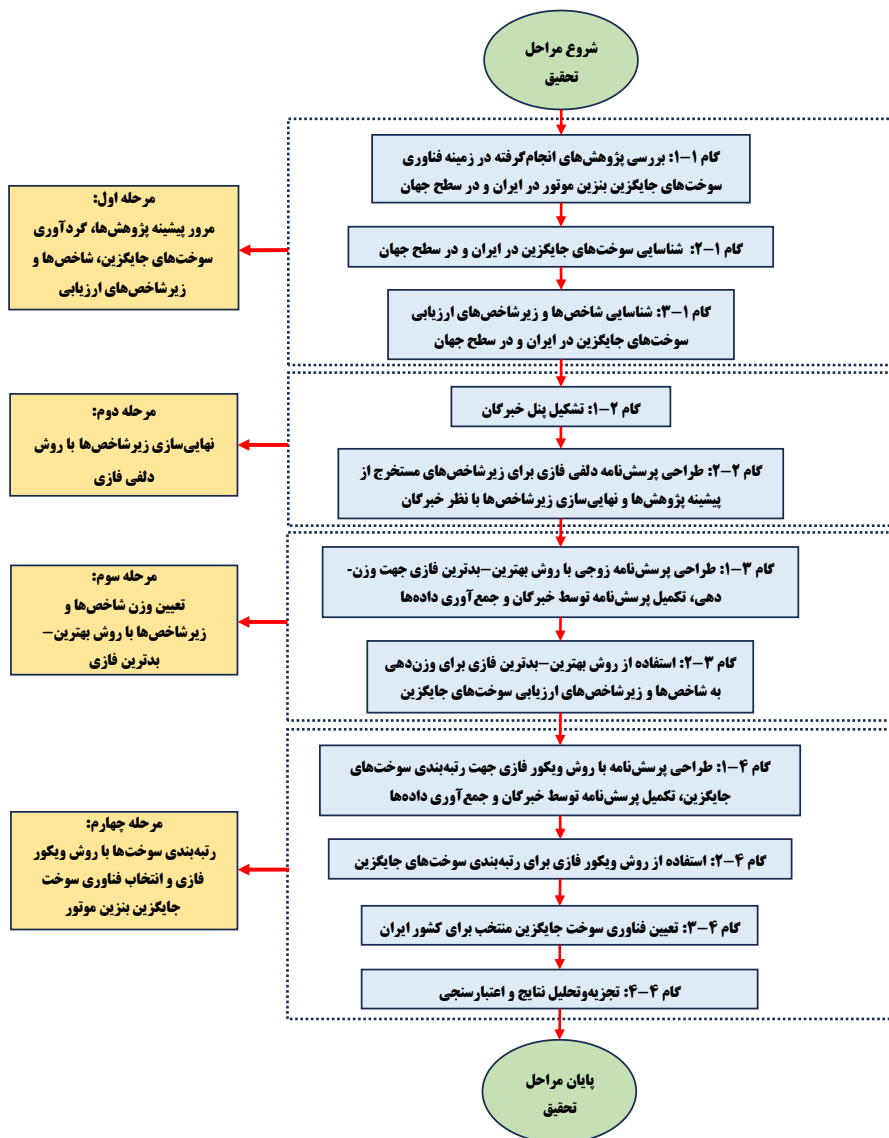
داده می‌شود. در گام نهایی از مرحله اول، نتایج به دست آمده از پرسش‌نامه تحلیل شده و زیرشاخص‌ها بومی‌سازی می‌گردد.

مرحله سوم: تعیین وزن شاخص‌های ارزیابی با روش بهترین-بدترین فازی؛ در گام اول از مرحله سوم، پرسش‌نامه زوجی شاخص‌های ارزیابی با روش بهترین-بدترین فازی طراحی شده و به خبرگان تحویل داده می‌شود. پس از جمع‌آوری پرسش‌نامه‌های مربوط به مقایسه شاخص‌های ارزیابی وزن شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها با روش بهترین-بدترین فازی توسط محقق تعیین می‌گردد. در ادامه، نتایج تجزیه و تحلیل شده و اعتبارسنجی می‌شوند.

مرحله چهارم: رتبه‌بندی گزینه‌ها (سوخت‌های جایگزین) با روش ویکور فازی؛ در گام اول از مرحله چهارم، پرسش‌نامه‌های روش ویکور فازی جهت امتیازدهی به گزینه‌ها (سوخت‌های جایگزین) طراحی شده و جهت تکمیل برای خبرگان ارسال می‌شود. پس از جمع‌آوری پرسش‌نامه‌های روش ویکور فازی، سوخت‌های جایگزین در کشور ایران با روش ویکور فازی رتبه‌بندی می‌شوند و سوخت جایگزین منتخب برای کشور ایران تعیین می‌گردد. در گام آخر از مرحله چهارم، نتایج تجزیه و تحلیل و اعتبارسنجی می‌شوند. در جدول (۴) روش و ابزار گردآوری داده‌ها و روش تجزیه و تحلیل داده‌ها در هر مرحله ارائه شده است.

جدول ۴: مراحل اجرایی، روش و ابزار گردآوری داده‌ها و روش تجزیه و تحلیل داده‌ها

شماره مرحله	عنوان مرحله	روش و ابزار گردآوری داده‌ها و روش تجزیه و تحلیل داده‌ها
۱	شناسایی سوخت‌های جایگزین و شاخص‌های ارزیابی آن‌ها	بررسی پیشینه تحقیقات و استفاده از پایگاه‌های علمی مانند گوگل اسکولار، اسکوپوس و وب‌آوساینس جهت گردآوری داده‌ها
۲	بومی‌سازی زیرشاخص‌ها براساس الزامات، قوانین و زیرساخت‌های فعلی سوختی کشور ایران	استفاده از روش دلفی فازی جهت نهایی‌سازی زیرشاخص‌ها، آماده‌سازی پرسش‌نامه این روش، استفاده از نظرات خبرگان متخصص و باتجربه
۳	تعیین وزن شاخص‌های ارزیابی	استفاده از روش بهترین-بدترین فازی جهت مقایسه شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها و وزن‌دهی به آن‌ها، آماده‌سازی پرسش‌نامه این روش، استفاده از نظرات خبرگان متخصص و باتجربه جهت وزن‌دهی
۴	رتبه‌بندی گزینه‌ها (سوخت‌های جایگزین)	استفاده از روش ویکور فازی جهت امتیازدهی به سوخت‌ها و رتبه‌بندی آن‌ها، آماده‌سازی پرسش‌نامه این روش، استفاده از نظرات خبرگان متخصص و باتجربه جهت امتیازدهی به سوخت‌ها



شکل ۱: چهارچوب مراحل اجرایی و گام‌های عملیاتی تحقیق حاضر



۳-۲. روش تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی

با توجه به ماهیت چندوجهی ارزیابی سوخت‌های جایگزین، استفاده از روش‌های ارزیابی چندشاخصه در این زمینه مناسب است. تصمیم‌گیری یک فرایند منظم و ساختارمند است که شامل چهار مرحله اصلی است: ۱. شناسایی مسئله؛ ۲. استخراج ترجیحات؛ ۳. ارزیابی گزینه‌ها و ۴. انتخاب بهترین گزینه. روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه مورد بررسی در این پژوهش عمدتاً در حوزه تحلیل توصیفی و هنجاری قرار دارند (تاکار^۱، ۲۰۲۱).

۳-۲-۱. مجموعه‌های فازی

داده‌های واقعی معمولاً دارای عدم قطعیت و ابهام هستند. اعداد فازی می‌توانند این عدم قطعیت را با ارائه طیفی از مقادیر ممکن، به‌جای یک مقدار دقیق، مدیریت کنند. این قابلیت به‌ویژه در کاربردهایی مانند تصمیم‌گیری، پیش‌بینی و کنترل سیستم‌ها بسیار مفید است (چانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۲: ۹۳-۹۹) یک «عدد فازی مثلثی»^۳ با سه عدد حقیقی به‌صورت $\tilde{a} = (a^l, a^m, a^u)$ نمایش داده می‌شود. «تابع عضویت»^۴ یک عدد فازی مثلثی به‌صورت زیر تعریف می‌شود (ژو و ژائو^۵، ۲۰۱۷: ۲۳-۳۱):

$$\mu_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a^l \\ \frac{x - a^l}{a^m - a^l}, & a^l \leq x \leq a^m \\ \frac{a^u - x}{a^u - a^m}, & a^m \leq x \leq a^u \\ 0, & x > a^u \end{cases} \quad (1)$$

که a^l ، a^m و a^u به ترتیب کران پایین (کم‌ترین مقدار)، مد (محتمل‌ترین مقدار) و کران بالا (بیش‌ترین مقدار) یک عدد فازی نامیده می‌شوند و $a^l \leq a^m \leq a^u$ است.

1. Thakkar

2. Chang et al.

3. Triangular fuzzy number (TFN)

4. Membership function

5. Guo & Zhao

۳-۲-۲. روش بومی سازی زیرشاخص ها

بومی سازی شاخص ها و زیرشاخص ها با روش دلفی فازی انجام می شود. این روش با هدف افزایش دقت در تصمیم گیری های گروهی و کاهش عدم قطعیت در نظرات کارشناسان به کار می رود. روش دلفی فازی از عبارات زبانی برای سنجش دیدگاه ها استفاده می کند و برای تعیین اهمیت شاخص ها، پیش بینی و غربالگری آن ها کاربرد دارد (حسن پور و نصری، ۱۴۰۱: ۱۷۷-۲۰۸).

۳-۲-۳. روش وزن دهی به شاخص ها و زیرشاخص ها

در پژوهش حاضر از روش بهترین-بدترین فازی برای وزن دهی به شاخص ها و زیرشاخص های ارزیابی استفاده می شود. روش بهترین-بدترین یک رویکرد تصمیم گیری چند شاخصه مبتنی بر مقایسه زوجی است. هدف این روش، یافتن وزن های بهینه و نسبت سازگاری از طریق یک مدل ساده بهینه سازی خطی است (رضائی، ۲۰۱۶: ۱۲۶-۱۳۰). گام های روش بهترین-بدترین فازی برای محاسبه وزن شاخص ها به شرح زیر است (ژو و ژائو، ۲۰۱۷: ۲۳-۳۱):

گام اول: شناسایی مجموعه ای از شاخص های ارزیابی؛ در این مرحله، تصمیم گیرنده مجموعه ای از شاخص های ارزیابی را شناسایی می کند.

گام دوم: انتخاب بهترین و بدترین شاخص؛ از میان شاخص های شناسایی شده، تصمیم گیرنده بهترین (مهم ترین) شاخص و بدترین (کم اهمیت ترین) شاخص را انتخاب می کند.

گام سوم: مقایسه بهترین شاخص با سایر شاخص ها با استفاده از متغیرهای زبانی؛ در این گام، تصمیم گیرنده با استفاده از متغیرهای زبانی به مقایسه زوجی بهترین شاخص نسبت به سایر شاخص ها می پردازند. سپس، ارزیابی های زبانی تصمیم گیرندگان به اعداد فازی مثلثی تبدیل می شوند.



گام چهارم: مقایسه سایر شاخص‌ها با بدترین شاخص با استفاده از متغیرهای زبانی؛ در این گام، تصمیم‌گیرنده با استفاده از متغیرهای زبانی، به مقایسه زوجی سایر شاخص‌ها با بدترین شاخص می‌پردازد. سپس، ارزیابی‌های زبانی تصمیم‌گیرندگان به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند.

گام پنجم: یافتن وزن‌های بهینه شاخص‌ها؛ در روش بهترین-بدترین فازی وزن بهینه شاخص‌ها با حل «مدل مین‌ماکس»^۱ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \min \max_j & \left\{ \left| \frac{\tilde{w}_B}{\tilde{w}_j} - \tilde{a}_{Bj} \right|, \left| \frac{\tilde{w}_j}{\tilde{w}_W} - \tilde{a}_{jW} \right| \right\} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{j=1}^n R(\tilde{w}_j) = 1 \\ w_j^l \leq w_j^m \leq w_j^u, w_j^l \geq 0 \text{ for all } j \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه فوق، $\tilde{w}_j = (w_j^l, w_j^m, w_j^u)$ ، $\tilde{w}_B = (w_B^l, w_B^m, w_B^u)$ و $\tilde{w}_W = (w_W^l, w_W^m, w_W^u)$ هستند. همچنین، $R(\tilde{w}_j)$ بیانگر «نمایش تجمیع میانگین درجه‌بندی شده»^۲ عدد فازی مثلثی است که از رابطه (۳) تعیین می‌شود:

$$R(\tilde{w}_j) = \frac{w_j^l + 4w_j^m + w_j^u}{6} \quad (3)$$

رابطه (۲) به مدل برنامه‌نویسی زیر قابل تبدیل است:

$$\begin{aligned} \min & \tilde{\xi} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \left| \frac{\tilde{w}_B}{\tilde{w}_j} - \tilde{a}_{Bj} \right| \leq \tilde{\xi} \\ \left| \frac{\tilde{w}_j}{\tilde{w}_W} - \tilde{a}_{jW} \right| \leq \tilde{\xi} \\ \sum_{j=1}^n R(\tilde{w}_j) = 1 \\ w_j^l \leq w_j^m \leq w_j^u, w_j^l \geq 0 \text{ for all } j \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

گام ششم: بررسی نسبت سازگاری روش بهترین-بدترین فازی؛ اگر نسبت سازگاری کوچک‌تر از ۰/۱ باشد، مقایسه‌ها دارای سازگاری قابل قبولی هستند.

1. Minmax model

2. Graded mean integration representation (GMIR)

۳-۲-۴. روش رتبه‌بندی سوخت‌ها

روش ویکور ابزار قدرتمندی است که می‌تواند برای انواع مسائل تصمیم‌گیری راهبردی در محیط‌های مختلف مانند اجتماعی، اقتصادی یا زیست‌محیطی استفاده شود. رویکرد ویکور شامل شناسایی گزینه‌های مختلف برای یک مسئله، تعیین اولویت بین آن‌ها، رتبه‌بندی آن‌ها و انتخاب بهترین راه‌حل سازشی براساس رتبه‌بندی است. گام‌های روش ویکور فازی به شرح زیر است (چانگ^۱، ۲۰۱۴: ۱۹۶-۲۱۲):

گام اول: شناسایی مجموعه‌ای از گزینه‌ها (سوخت‌های جایگزین)؛ در این مرحله، مجموعه‌ای از گزینه‌ها توسط تصمیم‌گیرنده شناسایی می‌شود.

گام دوم: تشکیل ماتریس تصمیم فازی؛ تصمیم‌گیرنده با استفاده از متغیرهای زبانی، امتیاز هر گزینه را تعیین می‌کند. سپس، امتیازها به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند.

گام سوم: شناسایی بهترین و بدترین مقدار فازی برای هر شاخص؛ برای هر شاخص (j) ، بهترین مقدار فازی $\tilde{f}_j^* = (x_{ij}^{l(*)}, x_{ij}^{m(*)}, x_{ij}^{u(*)})$ و بدترین مقدار فازی $\tilde{f}_j^- = (x_{ij}^{l(-)}, x_{ij}^{m(-)}, x_{ij}^{u(-)})$ به ترتیب از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آیند:

$$\tilde{f}_j^* = \begin{cases} \max_i \tilde{x}_{ij} & \text{for benefit criteria} \\ \min_i \tilde{x}_{ij} & \text{for cost criteria} \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{f}_j^- = \begin{cases} \max_i \tilde{x}_{ij} & \text{for benefit criteria} \\ \min_i \tilde{x}_{ij} & \text{for cost criteria} \end{cases} \quad (6)$$

که $\tilde{x}_{ij} = (x_{ij}^l, x_{ij}^m, x_{ij}^u)$ نشان‌دهنده رتبه عملکردی گزینه A_i در شاخص C_j است. گام چهارم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم فازی؛ ماتریس نرمال فازی برای شاخص‌های سود و هزینه به ترتیب از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند:

$$\tilde{d}_{ij} = (\tilde{f}_j^* - \tilde{x}_{ij}) / (x_{ij}^{u(*)} - x_{ij}^{l(-)}) \quad (7)$$



$$\tilde{d}_{ij} = (\tilde{x}_{ij} - \tilde{f}_j^*) / (x_{ij}^{u(-)} - x_{ij}^{l(+)} \quad (۸)$$

گام پنجم: محاسبه $\tilde{S}_i$ و $\tilde{R}_i$ برای هر گزینه؛ $\tilde{S}_i$ و $\tilde{R}_i$ برای گزینه i ام به ترتیب از روابط (۹) و (۱۰) تعیین می‌شوند:

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij} \quad (۹)$$

$$\tilde{R}_i = \max_j (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad (۱۰)$$

گام ششم: محاسبه شاخص ویکور برای هر گزینه؛ شاخص ویکور فازی برای گزینه i ام ($\tilde{Q}_i$) از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$\tilde{Q}_i = v \frac{\tilde{S}_i \ominus \tilde{S}^*}{\tilde{S}^{ou} - \tilde{S}^{*l}} \oplus (1 - v) \frac{\tilde{R}_i \ominus \tilde{R}^*}{\tilde{R}^{ou} - \tilde{R}^{*l}} \quad (۱۱)$$

پارامترهای $\tilde{S}^*$ ، $\tilde{S}^{ou}$ ، $\tilde{R}^*$ و $\tilde{R}^{ou}$ به ترتیب از روابط (۱۲) تا (۱۵) تعیین می‌گردند.

$$\tilde{S}^* = \min_i (\tilde{S}_i) \quad (۱۲)$$

$$\tilde{S}^{ou} = \max_i (\tilde{S}_i^u) \quad (۱۳)$$

$$\tilde{R}^* = \min_i (\tilde{R}_i) \quad (۱۴)$$

$$\tilde{R}^{ou} = \max_i (\tilde{R}_i^u) \quad (۱۵)$$

گام هفتم: فازی‌زدایی از داده‌ها؛ در این مرحله، داده‌ها فازی‌زدایی شده و اعداد قطعی به‌دست می‌آیند.

گام هشتم: رتبه‌بندی گزینه‌ها؛ مقادیر S ، R و Q گزینه‌ها در سه لیست به ترتیب صعودی رتبه‌بندی می‌شوند.

گام نهم: انتخاب راه‌حل مصالحه.

۴. یافته‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای نهایی‌سازی زیرشاخص‌ها، پرسش‌نامه روش دلفی فازی طی دو مرحله بین خبرگان توزیع گردید. شایان‌ذکر است که خبرگان این پژوهش دوازده نفر از اساتید و پژوهشگران دانشگاهی، متخصصان حوزه‌های انرژی، مدیریت و اقتصاد هستند. مشخصات خبرگان پژوهش حاضر در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: مشخصات خبرگان پژوهش حاضر.

شماره خبره	تخصص	مدرک تحصیلی	سمت	سن
خبره ۱	سلول‌های سوختی	کارشناسی ارشد	پژوهشگر حوزه انرژی	۳۰
خبره ۲	کارشناس بازرسی تست و تحویل تأسیسات برقی	کارشناسی ارشد	مدیر شرکت	۳۲
خبره ۳	مکانیک جامدات	دکتری تخصصی	هیئت علمی-استادیار	۳۲
خبره ۴	سوخت‌های زیستی	دکتری تخصصی	پژوهشگر حوزه انرژی	۳۲
خبره ۵	انرژی‌های تجدیدپذیر	دانشجوی دکتری تخصصی	مدرس دانشگاه	۳۲
خبره ۶	سوخت‌های جایگزین- انرژی‌های تجدیدپذیر	دکتری تخصصی	هیئت علمی-دانشیار	۴۲
خبره ۷	مکانیک سیالات	دانشجوی دکتری تخصصی	مدرس دانشگاه	۳۵
خبره ۸	حسابداری	دکتری تخصصی	هیئت علمی-دانشیار	۴۶
خبره ۹	اقتصاد	دکتری تخصصی	هیئت علمی-استادیار	۴۳
خبره ۱۰	صنایع	دکتری تخصصی	هیئت علمی-استادیار	۴۳
خبره ۱۱	مدیریت صنعتی	دکتری تخصصی	هیئت علمی-دانشیار	۴۳
خبره ۱۲	مدیریت صنعتی	دکتری تخصصی	هیئت علمی-استادیار	۳۶



در پایان مرحله اول، نه زیرشاخص جدید شامل «هزینه تولید وسایل نقلیه با سوخت جایگزین»، «کاهش قیمتی سوخت»، «دارا بودن منبع سوختی در کشور»، «سازگاری با وسایل نقلیه فعلی»، «تأثیر سوخت بر عملکرد وسیله نقلیه (از حیث شتاب، بیشینه سرعت، طول عمر پیشرانه)»، «سهولت انتقال و توزیع سوخت»، «ماندگاری و امکان ذخیره‌سازی سوخت»، «سهولت نظارت و کنترل زنجیره تأمین سوخت» و «امکان قاچاق سوخت» توسط خبرگان پیشنهاد شده‌اند که به پرسش‌نامه مرحله دوم اضافه شده است.

در جدول (۶) زیرشاخص‌هایی که در مرحله دوم (نهایی) پرسش‌نامه دلفی فازی تأیید یا رد شده‌اند، مشخص شده‌اند. مطابق این جدول، از میان بیست و پنج زیرشاخص موجود، هشت زیرشاخص شامل «هزینه تولید وسایل نقلیه با سوخت جایگزین»، «محتوای انرژی»، «سازگاری با وسایل نقلیه فعلی»، «آلودگی صوتی سوخت»، «مقبولیت اجتماعی سوخت»، «تأثیر بر رفاه اجتماعی»، «نرخ اشتغال‌زایی» و «امکان قاچاق سوخت» حذف شده و هفده زیرشاخص تأیید شده‌اند. در ادامه، زیرشاخص‌های تأیید شده به چهار شاخص اصلی شامل شاخص‌های «اقتصادی»، «فنی-فناوری»، «زیست‌محیطی» و «سیاست‌گذاری» تقسیم‌بندی شده‌اند.

جدول ۶: زیرشاخص‌های تأیید یا رد شده در مرحله نهایی پرسش‌نامه روش دلفی فازی.

شماره	زیرشاخص‌ها	تجمیع فازی داده‌ها	فازی‌زدایی داده‌ها	تأیید/رد
۱	هزینه تأمین و توزیع سوخت	(۰/۵، ۰/۹۷۶۳، ۱)	۰/۸۲۵۴	تأیید
۲	هزینه‌های پیاده‌سازی زیرساخت سوخت	(۰/۲۵، ۰/۸۵۷۶، ۱)	۰/۷۰۲۵	تأیید
۳	قیمت سوخت مصرفی	(۰/۲۵، ۰/۸۷۸۴، ۱)	۰/۷۰۹۵	تأیید
۴	هزینه تولید وسایل نقلیه با سوخت جایگزین	(۰، ۰/۷۷۱۵، ۱)	۰/۵۹۰۵	رد
۵	کاهش قیمتی سوخت	(۰/۲۵، ۰/۷۱۱۰، ۱)	۰/۶۵۳۷	تأیید
۶	دارا بودن منبع سوخت در کشور	(۰/۲۵، ۰/۷۶۴۰، ۱)	۰/۶۷۱۳	تأیید
۷	محتوای انرژی	(۰، ۰/۷۳۸۶، ۱)	۰/۵۷۹۵	رد

شماره	زیرشاخص‌ها	تجمیع فازی داده‌ها	فازی‌زدایی داده‌ها	تأیید/رد
۸	در دسترس بودن زیرساخت سوخت	(۰/۲۵، ۰/۷۹۰۳، ۱)	۰/۶۸۰۱	تأیید
۹	ایمنی سوخت	(۰/۲۵، ۰/۷۸۲۵، ۱)	۰/۶۷۷۵	تأیید
۱۰	بلوغ فناوری سوخت	(۰/۲۵، ۰/۶۹۴۱، ۱)	۰/۶۴۸۰	تأیید
۱۱	سازگاری با وسایل نقلیه فعلی	(۰، ۰/۷۰۴۰، ۱)	۰/۵۶۸۰	رد
۱۲	تأثیر سوخت بر عملکرد وسیله نقلیه	(۰/۲۵، ۰/۷۵۳۳، ۱)	۰/۶۶۷۸	تأیید
۱۳	سهولت انتقال و توزیع سوخت	(۰/۲۵، ۰/۸۵۷۶، ۱)	۰/۷۰۲۵	تأیید
۱۴	ماندگاری و امکان ذخیره‌سازی سوخت	(۰/۲۵، ۰/۷۹۸۱، ۱)	۰/۶۸۲۷	تأیید
۱۵	انتشار گازهای گلخانه‌ای	(۰/۲۵، ۰/۷۳۱۴، ۱)	۰/۶۶۰۵	تأیید
۱۶	انتشار گازهای آلاینده	(۰/۲۵، ۰/۷۷۴۹، ۱)	۰/۶۷۵۰	تأیید
۱۷	انتشار ذرات معلق جامد	(۰/۲۵، ۰/۷۳۸۶، ۱)	۰/۶۶۲۹	تأیید
۱۸	آلودگی صوتی	(۰، ۰/۴۹۷۸، ۱)	۰/۴۹۹۳	رد
۱۹	مقبولیت اجتماعی سوخت	(۰، ۰/۴۹۳۰، ۱)	۰/۴۹۷۷	رد
۲۰	تأثیر بر رفاه اجتماعی	(۰، ۰، ۱)	۰/۳۳۳۳	رد
۲۱	نرخ اشتغال‌زایی	(۰، ۰/۴۶۹۹، ۱)	۰/۴۹۰۰	رد
۲۲	حمایت دولتی	(۰/۲۵، ۰/۶۸۰۷، ۱)	۰/۶۴۳۶	تأیید
۲۳	امنیت سوخت	(۰/۲۵، ۰/۸۳۷۳، ۱)	۰/۶۹۵۸	تأیید
۲۴	سهولت نظارت و کنترل زنجیره تأمین سوخت	(۰/۲۵، ۰/۷۴۲۷، ۱)	۰/۶۶۴۲	تأیید
۲۵	امکان قاچاق سوخت	(۰، ۰/۶۲۷۲، ۱)	۰/۵۴۲۴	رد
حد آستانه		(۰/۱۸، ۰/۷۰۶۸، ۱)	۰/۶۲۸۹	

در تحقیق حاضر از روش بهترین-بدترین فازی جهت وزن‌دهی به شاخص‌های اصلی و زیرشاخص‌ها استفاده شده است. در این راستا، پرسش‌نامه روش بهترین-بدترین فازی طراحی شد و برای کسب نظرات، بین خبرگان توزیع گردید. در جدول (۷) وزن شاخص‌های اصلی وزن محلی و نهایی زیرشاخص‌ها و رتبه زیرشاخص‌ها نشان داده شده است. مطابق



این جدول، بیشترین وزن در میان شاخص‌های اصلی به ترتیب متعلق به شاخص اقتصادی (C1) با وزن ۰/۳۵۴، شاخص فنی-فناوری (C2) با وزن ۰/۲۷۵، شاخص زیست‌محیطی (C3) با وزن ۰/۲۴۴ و شاخص سیاست‌گذاری (C4) با وزن ۰/۱۲۷ است.

علاوه بر این، بیشترین وزن در میان زیرشاخص‌های اقتصادی به ترتیب متعلق به قیمت سوخت مصرفی (C13) با وزن ۰/۲۶۳، هزینه‌های تأمین و توزیع سوخت (C11) با وزن ۰/۲۳۵، هزینه‌های پیاده‌سازی زیرساخت (C12) سوخت با وزن ۰/۲۰۱، دارا بودن منبع سوخت در کشور (C15) با وزن ۰/۱۸۶ و کاهش قیمتی سوخت (C14) با وزن ۰/۱۱۵ است. همچنین، بیشترین وزن در میان زیرشاخص‌های فنی-فناوری به ترتیب متعلق به در دسترس بودن زیرساخت سوخت (C21) با وزن ۰/۲۰۴، تأثیر سوخت بر عملکرد وسیله نقلیه (C24) با وزن ۰/۲۰۲، ایمنی سوخت (C22) با وزن ۰/۱۹۸، سهولت انتقال و توزیع سوخت (C25) با وزن ۰/۱۳۸، بلوغ فناوری سوخت (C23) با وزن ۰/۱۳۳ و ماندگاری و امکان ذخیره‌سازی سوخت (C26) با وزن ۰/۱۲۵ هستند. علاوه بر این، جدول (۷) نشان می‌دهد که بیشترین وزن در میان زیرشاخص‌های زیست‌محیطی به ترتیب متعلق به انتشار ذرات معلق جامد (C33) با وزن ۰/۳۶۰، انتشار گازهای آلاینده (C32) با وزن ۰/۳۴۱ و انتشار گازهای گلخانه‌ای (C31) با وزن ۰/۲۹۹ هستند. همچنین، مطابق جدول (۷)، بیشترین وزن در میان زیرشاخص‌های زیست‌محیطی به ترتیب متعلق به امنیت سوخت (C42) با وزن ۰/۳۳۰، حمایت دولتی (C41) با وزن ۰/۳۶۷ و سهولت نظارت و کنترل زنجیره تأمین سوخت (C43) با وزن ۰/۳۰۳ هستند.

در تحقیق حاضر وزن‌های نهایی زیرشاخص‌ها از روش سلسه‌مراتبی حاصل شده است. در روش سلسه‌مراتبی وزن نهایی هر زیرشاخص از ضرب وزن شاخص اصلی مربوطه در وزن محلی زیرشاخص مورد نظر محاسبه می‌شود. برای مثال وزن نهایی زیرشاخص هزینه‌های تأمین و توزیع سوخت برابر ۰/۰۸۳ است که این مقدار از ضرب وزن محلی زیرشاخص مورد نظر (۰/۲۳۵) در وزن نهایی شاخص اقتصادی (۰/۳۵۴) به دست آمده است. مطابق جدول (۷)، از میان زیرشاخص‌های اقتصادی، بالاترین وزن (بهترین رتبه) به ترتیب

متعلق به قیمت سوختی مصرفی (وزن نهایی ۰/۰۹۳ و رتبه نهایی ۱)، هزینه‌های تأمین و توزیع سوخت (وزن نهایی ۰/۰۸۳ و رتبه نهایی ۳)، هزینه‌های پیاده‌سازی زیرساخت سوخت (وزن نهایی ۰/۰۷۱ و رتبه نهایی ۶)، دارا بودن منبع سوخت در کشور (وزن نهایی ۰/۰۶۶ و رتبه نهایی ۷) و کاهش قیمتی سوخت (وزن نهایی ۰/۰۴۱ و رتبه نهایی ۱۳) است. همچنین، در دسترس بودن زیرساخت سوخت (وزن نهایی ۰/۰۵۶ و رتبه نهایی ۸)، تأثیر سوخت بر عملکرد وسیله نقلیه از حیث شتاب، بیشینه سرعت، طول عمر پیشراشه (وزن نهایی ۰/۰۵۶ و رتبه نهایی ۸)، ایمنی سوخت (وزن نهایی ۰/۰۵۴ و رتبه نهایی ۱۰)، سهولت انتقال و توزیع سوخت (وزن نهایی ۰/۰۳۸ و رتبه نهایی ۱۴)، بلوغ فناوری سوخت (وزن نهایی ۰/۰۳۷ و رتبه نهایی ۱۶) و ماندگاری و امکان ذخیره‌سازی سوخت (وزن نهایی ۰/۰۳۴ و رتبه نهایی ۱۷) به ترتیب بیشترین وزن (بهترین رتبه) را در میان زیرشاخص‌های اقتصادی به خود اختصاص داده‌اند. در میان زیرشاخص‌های زیست‌محیطی، انتشار ذرات معلق جامد (وزن نهایی ۰/۰۸۸ و رتبه نهایی ۲)، انتشار گازهای آلاینده (وزن نهایی ۰/۰۸۳ و رتبه نهایی ۳) و انتشار گازهای گلخانه‌ای (وزن نهایی ۰/۰۷۳ و رتبه نهایی ۵) به ترتیب بیشترین وزن نهایی (بهترین رتبه نهایی) را دارا هستند. همچنین، در میان شاخص‌های سیاست‌گذاری، امنیت سوخت (وزن نهایی ۰/۰۴۷ و رتبه نهایی ۱۱)، حمایت دولتی (وزن نهایی ۰/۰۴۲ و رتبه نهایی ۱۲) و سهولت نظارت و کنترل زنجیره تأمین سوخت (وزن نهایی ۰/۰۳۸ و رتبه نهایی ۱۴) به ترتیب از بیشترین وزن (بهترین رتبه) برخوردار هستند. بنابراین، از دیدگاه خبرگان پژوهش حاضر، شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی دارای بیشترین اهمیت هستند. نتایج نشان داد که در میان پنج زیرشاخص برتر، دو زیرشاخص متعلق به شاخص اقتصادی (به ترتیب شامل قیمت سوخت مصرفی و هزینه‌های تأمین و توزیع سوخت) و سه زیرشاخص متعلق به شاخص زیست‌محیطی (به ترتیب شامل انتشار ذرات معلق جامد، انتشار گازهای آلاینده و انتشار گازهای گلخانه‌ای) هستند.

در تحقیق حاضر از روش ویکور فازی جهت رتبه‌بندی سوخت‌ها استفاده شده است. برای تکمیل پرسش‌نامه روش ویکور فازی (تکمیل ماتریس تصمیم فازی)، از خبرگان



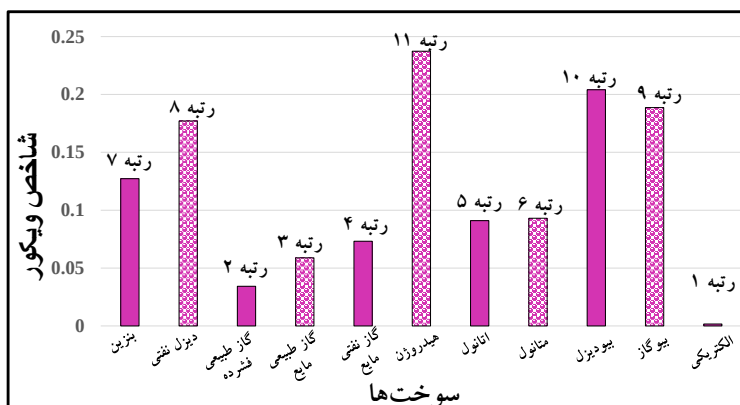
درخواست شد تا با استفاده از عبارت‌های زبانی، نظرشان را درباره سوخت‌های یازده‌گانه مورد بررسی در تحقیق حاضر از دیدگاه هفده زیرشاخص نهایی بیان کنند. در ادامه، عبارت‌های زبانی با استفاده از قوانین تبدیل، به اعداد فازی مثلثی تبدیل شدند. در شکل (۲) مقادیر شاخص ویکور و رتبه سوخت‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل، سوخت الکتریکی کم‌ترین مقدار شاخص ویکور (برابر ۰/۰۰۱۷) را به خود اختصاص داده است. از آنجایی که این سوخت هر دو شرط مورد نیاز روش ویکور فازی را دارا است در نتیجه به عنوان بهترین سوخت از دیدگاه روش تصمیم‌گیری ویکور فازی معرفی می‌شود. پس از سوخت الکتریکی، به ترتیب گاز طبیعی فشرده (CNG)، گاز طبیعی مایع (LNG)، گاز نفتی مایع (LPG)، اتانول، متانول، بنزین، دیزل نفتی، بیوگاز، بیودیزل و هیدروژن در رتبه‌های دوم تا یازدهم قرار گرفته‌اند.

برای اعتبارسنجی نتایج، از روش تاپسیس فازی برای رتبه‌بندی سوخت‌ها استفاده شد تا اطمینان حاصل شود که تغییر روش رتبه‌بندی، سوخت برتر را تغییر نمی‌دهد. نتایج نشان دادند که در این روش نیز سوخت الکتریکی به عنوان بهترین گزینه انتخاب شده است. پس از آن، به ترتیب گاز طبیعی فشرده (CNG)، بنزین، دیزل نفتی، گاز نفتی مایع (LPG)، گاز طبیعی مایع (LNG)، اتانول، متانول، بیودیزل، بیوگاز و هیدروژن در رتبه‌های دوم تا یازدهم قرار گرفتند.

جدول ۷: وزن نهایی و رتبه نهایی شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها.

شاخص اصلی	وزن شاخص اصلی	زیرشاخص	وزن محلی زیرشاخص	وزن نهایی زیرشاخص	رتبه نهایی زیرشاخص
اقتصادی (C1)	۰/۳۵۴	هزینه‌های تأمین و توزیع سوخت (C11)	۰/۲۳۵	۰/۰۸۳	۳
		هزینه‌های پیاده‌سازی زیرساخت سوخت (C12)	۰/۲۰۱	۰/۰۷۱	۶
		قیمت سوخت مصرفی (C13)	۰/۲۶۳	۰/۰۹۳	۱

شاخص اصلی	وزن شاخص اصلی	زیر شاخص	وزن محلی زیر شاخص	وزن نهایی زیر شاخص	رتبه نهایی زیر شاخص
		کشش قیمتی سوخت (C14)	۰/۱۱۵	۰/۰۴۱	۱۳
		دارا بودن منبع سوخت در کشور (C15)	۰/۱۸۶	۰/۰۶۶	۷
فنی-فناوری (C2)	۰/۲۷۵	در دسترس بودن زیرساخت سوخت (C21)	۰/۲۰۴	۰/۰۵۶	۸
		ایمنی سوخت (C22)	۰/۱۹۸	۰/۰۵۴	۱۰
		بلوغ فناوری سوخت (C23)	۰/۱۳۳	۰/۰۳۷	۱۶
		تأثیر سوخت بر عملکرد وسیله نقلیه از حیث شتاب، بیشینه سرعت، طول عمر پيشرانه (C24)	۰/۲۰۲	۰/۰۵۶	۸
		سهولت انتقال و توزیع سوخت (C25)	۰/۱۳۸	۰/۰۳۸	۱۴
		ماندگاری و امکان ذخیره سازی سوخت (C26)	۰/۱۲۵	۰/۰۳۴	۱۷
		انتشار گازهای گلخانه ای (C31)	۰/۲۹۹	۰/۰۷۳	۵
زیست محیطی (C3)	۰/۲۴۴	انتشار گازهای آلاینده (C32)	۰/۳۴۱	۰/۰۸۳	۳
		انتشار ذرات معلق جامد (C33)	۰/۳۶۰	۰/۰۸۸	۲
		حمایت دولتی (C41)	۰/۳۳۰	۰/۰۴۲	۱۲
سیاست گذاری (C4)	۰/۱۲۷	امنیت سوخت (C42)	۰/۳۶۷	۰/۰۴۷	۱۱
		سهولت نظارت و کنترل زنجیره تأمین سوخت (C43)	۰/۳۰۳	۰/۰۳۸	۱۴



شکل ۲: مقادیر قطعی شاخص ویکور و رتبه سوخت‌های مختلف از دیدگاه روش ویکور فازی

تجزیه و تحلیل حساسیت اثر وزن‌های مختلف را بر رتبه‌بندی نهایی نشان می‌دهد و پایداری رتبه‌بندی جامع را ارزیابی می‌کند. تغییر وزن زیرشاخص‌ها یک روش رایج برای تحلیل حساسیت است. تحلیل حساسیت این مطالعه به دنبال ارزیابی تأثیر وزن‌های زیرشاخص‌ها بر پاسخ‌ها است. به این منظور، شش سناریو برای نشان دادن اثر وزن‌های مختلف زیرشاخص‌ها طراحی شده است. در سناریوی اول، وزن پنج مورد از مهم‌ترین شاخص‌ها نسبت حالت اولیه به میزان ۲۰ درصد کاهش می‌یابد؛ در سناریوی دوم، وزن پنج مورد از ضعیف‌ترین شاخص‌ها نسبت حالت اولیه به میزان ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. سناریوهای اول و دوم به‌طور هم‌زمان در سناریوی سوم اعمال می‌شوند. سناریوهای چهارم، پنجم و ششم از ساختاری مشابه با سه سناریوی اول پیروی می‌کنند؛ اما در این سناریوها وزن ۳۰ درصد تغییر می‌کند (زلفانی و همکاران^۱، ۲۰۲۳: ۱۳۷۳۶).

جدول (۸) رتبه سوخت‌ها در روش ویکور فازی برای سناریوهای مختلف ارائه شده است. لازم به ذکر است که منظور از سناریوی صفر همان حالت اصلی (قبل از اعمال تغییر در وزن‌ها) است.

با انجام تحلیل حساسیت مشخص گردید که روش ویکور فازی در این مسئله پایدار بوده و نتیجه نهایی وابستگی ناچیزی به تغییر وزن زیرشاخص‌ها دارد.

جدول ۸: رتبه سوخت‌ها در روش ویکور فازی برای سناریوهای مختلف

سوخت	شماره سناریو					
	ششم	پنجم	چهارم	سوم	دوم	اول
بنزین	۷	۷	۵	۷	۷	۷
دیزل نفتی	۸	۸	۸	۸	۸	۸
گاز طبیعی فشرده (CNG)	۲	۲	۲	۲	۲	۲
گاز طبیعی مایع (LNG)	۳	۳	۴	۳	۳	۳
گاز نفتی مایع (LPG)	۴	۴	۳	۴	۴	۴
هیدروژن	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
اتانول	۵	۵	۶	۵	۵	۵
متانول	۶	۶	۷	۶	۶	۶
بیودیزل	۱۰	۱۰	۹	۱۰	۱۰	۱۰
بیوگاز	۹	۹	۱۰	۹	۹	۹
الکتریکی	۱	۱	۱	۱	۱	۱

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

پژوهش حاضر باهدف شناسایی و انتخاب سوخت جایگزین بنزین موتور در ایران انجام شده است. برای انتخاب سوخت‌های جایگزین در ایران، ابتدا پژوهش‌های مرتبط با سوخت‌های جایگزین بنزین موتور در ایران و در دنیا انتخاب، بررسی و مطالعه شدند. به این منظور، از روش دلفی فازی برای بومی‌سازی زیرشاخص‌ها، روش بهترین-بدترین فازی برای وزن‌دهی به شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها و روش ویکور فازی برای رتبه‌بندی سوخت‌ها استفاده شده است. در پایان مرحله اول پرسش‌نامه روش دلفی فازی، نه زیرشاخص جدید توسط خبرگان پیشنهاد شده‌اند که به پرسش‌نامه مرحله دوم اضافه شده است. در مرحله دوم این روش، از میان بیست و پنج زیرشاخص موجود، هشت زیرشاخص حذف گردیده و هفده



زیرشاخص تأیید شده‌اند. زیرشاخص‌های باقی‌مانده شامل «هزینه‌های تأمین و توزیع سوخت»، «هزینه‌های پیاده‌سازی زیرساخت سوخت»، «قیمت سوخت مصرفی»، «کشش قیمتی سوخت»، «دارا بودن منبع سوخت در کشور»، «در دسترس بودن زیرساخت سوخت»، «ایمنی سوخت»، «بلوغ فناوری سوخت»، «تأثیر سوخت بر عملکرد وسیله نقلیه»، «سهولت انتقال و توزیع سوخت»، «ماندگاری و امکان ذخیره‌سازی سوخت»، «انتشار گازهای گلخانه‌ای»، «انتشار گازهای آلاینده»، «انتشار ذرات معلق جامد»، «حمایت دولتی»، «امنیت سوخت» و «سهولت نظارت و کنترل زنجیره تأمین سوخت» هستند. در ادامه، این زیرشاخص‌ها به چهار شاخص اصلی شامل شاخص‌های «اقتصادی»، «فنی-فناوری»، «زیست‌محیطی» و «سیاست‌گذاری» تقسیم‌بندی شده‌اند.

در تحقیق حاضر از روش بهترین-بدترین فازی جهت وزن‌دهی به شاخص‌های اصلی و زیرشاخص‌ها استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین وزن در میان شاخص‌های اصلی به ترتیب متعلق به «شاخص اقتصادی» با وزن $0/354$ ، «شاخص فنی-فناوری» با وزن $0/275$ ، «شاخص زیست‌محیطی» با وزن $0/244$ و «شاخص سیاست‌گذاری» با وزن $0/127$ تعیین گردید. علاوه بر این، نتایج نشان داد که در میان پنج زیرشاخص برتر (از میان هفده زیرشاخص)، دو زیرشاخص متعلق به شاخص اقتصادی (به ترتیب شامل قیمت سوخت مصرفی و هزینه‌های تأمین و توزیع سوخت) و سه زیرشاخص متعلق به شاخص زیست‌محیطی (به ترتیب شامل انتشار ذرات معلق جامد، انتشار گازهای آلاینده و انتشار گازهای گلخانه‌ای) هستند. در ادامه، از روش ویکور فازی برای رتبه‌بندی سوخت‌ها بهره گرفته شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، «سوخت الکتریکی» کم‌ترین مقدار شاخص ویکور را به خود اختصاص داده و در نتیجه به‌عنوان فناوری برتر جایگزین بنزین موتور برای کشور ایران معرفی می‌شود. پس از سوخت الکتریکی، به ترتیب «گاز طبیعی فشرده (CNG)»، «گاز طبیعی مایع (LNG)»، «گاز نفتی مایع (LPG)»، «اتانول»، «متانول»، «بنزین»، «دیزل نفتی»، «بیوگاز»، «بیودیزل» و «هیدروژن» در رتبه‌های دوم تا یازدهم قرار گرفته‌اند. همچنین، در روش رتبه‌بندی تاپسیس نیز «سوخت الکتریکی» جایگاه اول را حفظ کرده و «گاز طبیعی

فشرده (CNG)) به عنوان گزینه دوم معرفی شده است. این انتخاب نشان دهنده پتانسیل بالای موتورهای الکتریکی برای جایگزینی با موتورهای بنزینی است. استفاده از سوخت های جایگزین بنزین، به ویژه موتورهای الکتریکی نتایج متعددی به همراه دارد که برخی از آنها به شرح زیر هستند:

توسعه خودروهای الکتریکی می تواند وابستگی کشور به بنزین را کاهش دهد. این اقدام به کنترل مشکل ناترازی بنزین، جلوگیری از واردات بیش از حد و دستیابی به خودکفایی در تأمین سوخت مورد نیاز کشور کمک می کند.

استفاده از خودروهای الکتریکی سبب کاهش مصرف بنزین و ایجاد تعادل در عرضه و تقاضای بنزین می شود.

تنوع در منابع انرژی و بهره گیری از سوخت های جایگزین می تواند امنیت انرژی کشور را ارتقا دهد و در مواجهه با بحران های انرژی یا حملات به زیرساخت های نفتی، پایداری صنعت دفاعی را تضمین کند. این موضوع نقش مهمی در تقویت توان دفاعی کشور، افزایش امنیت ملی و حفظ استقلال سیاسی دارد.

کاهش هزینه های مرتبط با تأمین و حمل و نقل سوخت های بنزینی می تواند به تخصیص منابع مالی بیشتر به دیگر جنبه های بخش دفاعی مانند تحقیق و توسعه، آموزش و خرید تجهیزات پیشرفته کمک کند.

حرکت به سمت سوخت های پاک جایگزین بنزین موتور، فرصت های جدیدی را برای توسعه فناوری های پاک، پایدار، ایجاد شرکت های جدید و رشد صنعت های مرتبط با انرژی پایدار ایجاد می کند. این رویکرد به تقویت اقتصاد ملی و کاهش هزینه های حمل و نقل کمک می کند.

با این وجود، پیاده سازی و توسعه سوخت جایگزین منتخب در کشور با چالش های مختلفی روبه رو است که برخی از آنها به شرح زیر هستند:

❖ کمبود زیرساخت های مناسب برای شارژ خودروهای الکتریکی در سطح شهر؛

❖ نبود دانش کافی در زمینه تولید باتری های پیشرفته در کشور؛



- ❖ عدم اختصاص مشوق‌های مالی برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان خودروهای الکتریکی در کشور؛
- ❖ فقدان علاقه و انگیزه مصرف‌کنندگان به استفاده از سوخت‌های جایگزین به دلیل اختصاص یارانه سنگین به سوخت بنزین؛
- ❖ مقاومت مصرف‌کنندگان در پذیرش خودروهای با سوخت جایگزین به دلیل آگاهی ناکافی از مزایا و ویژگی‌های آن.

۵-۱. پیشنهادهای پژوهش

پیشنادهایی که برای مطالعات آینده و پژوهش‌های تکمیلی ارائه می‌شوند، شامل موارد زیر هستند:

- ✓ ارائه مدل مفهومی و مدل ریاضی زنجیره تأمین سوخت جایگزین منتخب و مقایسه آن با زنجیره تأمین بنزین؛
- ✓ مطالعه بر روی انواع فناوری‌های شارژ خودروهای الکتریکی؛
- ✓ بررسی طول عمر، ظرفیت و کارایی انواع باتری‌های مورد استفاده در خودروهای الکتریکی؛
- ✓ مطالعه روش‌های بازیافت باتری‌ها و بررسی راهکارهای کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از دورریز آن‌ها؛
- ✓ استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی برای تعیین مکان مناسب برای ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی در سطح شهر؛
- ✓ ارزیابی میزان پذیرش اجتماعی و فرهنگی خودروهای الکتریکی و سایر فناوری‌های جایگزین در کشور؛
- ✓ بررسی آینده سوخت بنزین و پایداری زنجیره تأمین سوخت‌های جایگزین.

فهرست منابع

- امین طهماسبی، حمزه؛ رضوی نسب، سید جمال‌الدین (۱۳۹۸). «*بهبود استفاده از سوخت CNG در بخش حمل و نقل با رویکرد تحلیل و توسعه گزینه‌های استراتژیک*»، نشریه علمی (فصلنامه) پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، ۵ (۱۵)، ۱۴۵-۱۶۹.
- حسن‌پور، حسین؛ نصری، سید امیر (۱۴۰۱). «*شناسایی و تکنیک‌های جنگ روانی با استفاده از روش ترکیبی دلفی فازی و تحلیل شبکه‌ای*»، فصلنامه آماد و فناوری دفاعی، ۵ (۱۶)، ۱۷۷-۲۰۸.
- خبرگزاری تسنیم (۱۴۰۳). «*سرايه مصرف بنزين ۲ برابر شد*»، تاريخ دريافت: ۲۴ فروردين ۱۴۰۳، قابل دسترسی در: <https://www.tasnimnews.com/fa/news/1403/01/24/3067012>
- خلیلی، سید محمد؛ پویا، علیرضا؛ کاظمی، مصطفی؛ فکور ثقیه، امیرمحمد (۱۴۰۱). «*طراحی یک شبکه زنجیره تأمین بنزین پایدار و تاب‌آور تحت شرایط عدم قطعیت اختلال (مطالعه موردی: شبکه زنجیره تأمین بنزین استان خراسان رضوی)*»، مدیریت صنعتی، ۱۴ (۱)، ۲۷-۷۹.
- عرب، علیرضا؛ شیخ‌الاسلام، محمدعلی؛ عبدالهی لاشکی، سعید (۱۴۰۳). «*ارائه چهارچوبی به‌منظور توسعه مدل بهینه‌سازی ریاضی زنجیره تأمین پایدار بنزین کشور*»، فصلنامه مطالعات بین‌رشته‌ای دانش راهبردی، ۱۴ (۵۴)، ۲۶۷-۲۹۴.



References

- Aboushaqrah, N. N., Onat, N. C., Kucukvar, M., Hamouda, A., Kusakci, A. O., & Ayvaz, B. (2022). Selection of alternative fuel taxis: a hybridized approach of life cycle sustainability assessment and multi-criteria decision making with neutrosophic sets. *International Journal of Sustainable Transportation*, 16(9), 833-846.
- Barrett, S. (2011) European Expert Group reports on future transport fuels. *Fuel Cells Bulletin*, 2011(2), 12-16.
- Bayat, R., Ashrafi, K., Motlagh, M. S., Hassanvand, M. S., Daroudi, R., Fink, G., & Künzli, N. (2019). Health impact and related cost of ambient air pollution in Tehran. *Environmental research*, 176, 108547.
- Chang, P.-L., Hsu, C.-W., & Lin, C.-Y. (2012). Assessment of hydrogen fuel cell applications using fuzzy multiple-criteria decision making method. *Applied Energy*, 100, 93-99.
- Chang, T.-H. (2014). Fuzzy VIKOR method: A case study of the hospital service evaluation in Taiwan. *Information Sciences*, 271, 196-212.
- El Hafdaoui, H., Jelti, F., Khallaayoun, A., Jamil, A., & Ouazzani, K. (2024). Energy and environmental evaluation of alternative fuel vehicles in Maghreb countries. *Innovation and Green Development*, 3(1), 100092.
- Gao, D., Li, Z., Liu, P., Zhao, J., Zhang, Y., & Li, C. (2018). A coordinated energy security model taking strategic petroleum reserve and alternative fuels into consideration. *Energy*, 145, 171-181.
- Guo, S., & Zhao, H. (2017). Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Knowledge-based systems*, 121, 23-31.
- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2024). Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 310-333.
- Hezam, I. M., Mishra, A. R., Rani, P., Cavallaro, F., Saha, A., Ali, J., Štreimikienė, D. (2022). A hybrid intuitionistic fuzzy-MEREC-RS-DNMA method for assessing the alternative fuel vehicles with sustainability perspectives. *Sustainability*, 14(9), 5463.
- Khan, M. Z. A., Khan, H. A., Ravi, S. S., Turner, J. W., & Aziz, M. (2023). Potential of clean liquid fuels in decarbonizing transportation—An overlooked net-zero pathway? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113483.
- Li, C., Negnevitsky, M., Wang, X., Yue, W. L., & Zou, X. (2019). Multi-criteria analysis of policies for implementing clean energy vehicles in China. *Energy policy*, 129, 826-840.
- Maimoun, M., Madani, K., & Reinhart, D. (2016). Multi-level multi-criteria analysis of alternative fuels for waste collection vehicles in the United States. *Science of The Total Environment*, 550, 349-361.
- Mohamadabadi, H. S., Tichkowsky, G., & Kumar, A. (2009). Development of a multi-criteria assessment model for ranking of renewable and non-renewable transportation fuel vehicles. *Energy*, 34(1), 112-125.
- Okoh, A. S., & Onuoha, M. C. (2024). Immediate and future challenges of using electric vehicles for promoting energy efficiency in Africa's clean energy transition. *Global Environmental Change*, 84, 102789.

- Oztaysi, B., Onar, S. C., Kahraman, C & .Yavuz, M. (2017). Multi-criteria alternative-fuel technology selection using interval-valued intuitionistic fuzzy sets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 128-148.
- Ramadhas, A. S. (2011). *Alternative fuels for transportation*. Taylor & Francis.
- Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130.
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2009). *Research methods for business students*. Pearson education.
- Sehatpour, M.-H., & Kazemi, A. (2018). Sustainable fuel portfolio optimization: Integrated fuzzy multi-objective programming and multi-criteria decision making. *Journal of Cleaner Production*, 176, 304-319.
- Sehatpour, M.-H., Kazemi, A., & Sehatpour, H.-e. (2017). Evaluation of alternative fuels for light-duty vehicles in Iran using a multi-criteria approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 295-310.
- Thakkar, J. J. (2021). *Multi-criteria decision making* (Vol. 336). Springer.
- Tsita, K. G., & Pilavachi, P .A. (2012). Evaluation of alternative fuels for the Greek road transport sector using the analytic hierarchy process. *Energy policy*, 48, 677-686.
- Ugurlu, A., & Oztuna, S. (2015). A comparative analysis study of alternative energy sources for automobiles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11178-11188.
- Zolfani, S. H., Görener, A., & Toker, K. (2023). A hybrid fuzzy MCDM approach for prioritizing the solutions of resource recovery business model adoption to overcome its barriers in emerging economies. *Journal of Cleaner Production*, 413, 13736.